

发动机装配线人工工位的人因时变可靠性建模

李爱平, 陆嘉庆, 赵亚西, 范国良, 徐立云

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 为了描述发动机装配线的人工工位随工作日及作业次数变化的人因可靠性, 提出一种考虑最短认知过程、认知疲劳及最短生理操作过程的人因时变可靠性模型。基于学习遗忘与疲劳恢复理论, 考虑最短认知过程和认知疲劳给出认知时间的表达方式, 结合最短生理操作过程对作业时间进行描述, 求得疲劳失误率, 依据节拍及 HCR (human cognitive reliability) 方法确定认知失误率。通过计算由认知及疲劳引起的时间变化量得到失误权重, 构建人工工位的人因时变可靠性模型, 以实例验证了模型的有效性, 为实际生产中的人因可靠性计算及产能预测提供依据。

关键词: 装配线; 人工工位; 人因时变可靠性建模; 认知; 疲劳

中图分类号: TH165.4

文献标志码: A

Human Time Variant Reliability Modeling of Manual Station on Engine Assembly Line

LI Aiping, LU Jiaqing, ZHAO Yaxi, FAN Guoliang, XU Liyun

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To quantitatively describe the human reliability of manual station on engine assembly line within different working days and operation times, a model was proposed considering the shortest cognitive process, cognitive fatigue, and the shortest operation process. Based on the learning-forgetting and fatigue-recovery theory, the cognitive time was developed with the shortest cognitive process and cognitive fatigue, while the operation time was developed with the shortest operation process. According to the cognitive time and operation time, fatigue failure rate was calculated and cognitive failure rate was introduced with the HCR (human cognitive reliability) method. After obtaining the failure coefficient according to their time variance, a human time variant reliability model was built. A case study verified the feasibility of the model. The result can be used in human

reliability evaluation and product prediction.

Key words: assembly line; manual station; human time variant reliability modeling; cognitive; fatigue

工业水平的发展对人、机结合的生产系统提出了更高的要求。人机系统的可靠性很大程度上取决于人的可靠性。在汽车发动机的装配过程中, 人因装配失误导致的缺陷占装配缺陷总数的 25%^[1], 导致产品返修率较高及生产率偏低。由此可见, 装配过程中人因可靠性的研究已经成为现代制造业的关键问题。其中, 人因可靠性建模为相关研究的基础, 其合理性对后续的研究有着重大的影响。

人因可靠性 (human reliability, HR) 用以描述人员正确完成作业的概率, 根据其经典定义^[2], 对装配线的人工工位而言, 其可描述为: 人员的作业时间小于节拍, 且不发生作业失误的概率。其中, 作业失误指人员的作业不符合装配工艺。根据经典的人因可靠性分析 (human reliability analysis, HRA) 方法, 如 HCR (human cognitive reliability) 法^[3], 可以计算出人员作业时静态的人因可靠性^[4-5]。但在实际的发动机装配线中, 由于人员的认知及疲劳程度会随着工作日及作业次数而改变, 并导致人因可靠性的动态变化, 因此人工工位的人因可靠性具有时变性, 而经典方法难以反映这一特点。为了得到随工作日及作业次数而变的人因时变可靠性, 首先需要描述认知及疲劳程度的变化过程。

由于装配线的作业环境及作业内容比较稳定, 因此一般学者们认为人员的认知程度可由其作业时间的长短体现。由学习效应及其功率曲线^[6]可知, 不间断作业时, 作业次数的增加将提高认知程度, 并使作业时间下降。但实际上发现在单个工作日内经过长时间的作业后, 基于该功率曲线所描述的理论作

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 上海市科委项目 (15111105500); 上海市重大技术装备研制专项 (ZB-ZBYZ-01-14-1562)

第一作者: 李爱平 (1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为制造系统与自动化。E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

业时间偏小, Dar-el 等^[7]针对该问题, 考虑学习效应与肢体训练效应的影响, 建立了基于复合功率曲线的作业时间模型. Jaber 等^[8]为了描述在单个工作日内出现作业间断时, 由遗忘现象引起的作业时间的延长量, 引入记忆作业次数, 基于功率曲线建立了作业时间模型. 进一步地, Jaber 等^[9]考虑了作业过程中的疲劳问题, 在文献^[8]的基础上结合了疲劳与恢复模型, 提出了描述作业时间的 LFFRM (learning forgetting fatigue recovery model) 模型.

在疲劳过程的研究方面, 虽然其机理尚不明确, 但也有较多的学者对其定量化描述进行了研究. Konz^[10]基于指数模型, 考虑疲劳及恢复因素, 给出了作业不间断时随作业时间而变的疲劳程度的定量化表达方式. 随着生理监测设备的发展, 较多研究通过监测人员作业时的生理状态对疲劳过程进行描述. 蔡敏等^[11]通过对装配线上人员在单个工作日内作业时的脑电数据进行分析, 提出了一种寻找易疲劳工序的分析方法. 但由于在实际生产环境中采集人员的生理数据较为困难, 也有学者通过仿真分析的方法对疲劳过程进行研究. 马红占等^[12]为了减轻装配作业中的疲劳程度, 对单次装配作业进行了研究, 提出了一种基于虚拟仿真技术与人因分析方法的装配序列综合评价模型.

在单个工作日内的作业过程中, 认知及疲劳过程会同时存在, 因而受其影响的人的失误率类似浴缸曲线^[13], 据此可以定性地对人因可靠性进行描述. 为了能够定量地评价装配线人工工位的人因失误率, Elmaraghy 等^[14]通过对认知及疲劳过程等其他因素进行标准化处理并加权, 基于经验判断的加权值, 提出了一种人因失误率计算方法. 基于该方法, Michalos 等^[15]为了确定装配线人工工位轮岗后人因失误率的变化程度, 通过考虑人员的认知能力、身体能力、作业重复性及作业的疲劳指数, 得到了不同的轮岗方案下的人因失误率. Givi 等^[16]为了获得单个工作日内人工工位的人因可靠性, 将文献^[14]中的人因失误率计算方法与 LFFRM^[9]模型相结合, 引入认知及疲劳失误率, 根据经验确定失误权重, 建立了单个工作日内的人因可靠性模型.

综上所述, 国内外学者对人工工位的作业时间及其人因可靠性建模进行了深入的研究, 一定程度上描述了作业时间与认知及疲劳程度之间的非线性关系, 证明了根据经典 HRA 方法计算人工工位的静态人因可靠性的有效性, 以及从作业时间角度计算可靠性的可行性. 但现有研究仍存在以下不足: 在

描述实际装配线人工工位的作业时间时, 未考虑最短认知过程、最短生理操作过程、认知疲劳, 致使作业时间收敛过快、理论产量过高, 与实际偏差较大; 在计算人因可靠性时, 未考虑作业时间超出节拍的情况, 以及作业时间随工作日变化的问题, 故难以反映节拍的要求, 以及随工作日及作业次数而变的人因可靠性.

基于此, 本文从认知及疲劳的角度对作业过程进行研究, 考虑最短认知过程、认知疲劳及最短生理操作过程, 分别确定随工作日变化的认知时间及作业时间, 计算疲劳失误率及基于 HCR 方法的认知失误率, 根据认知及疲劳引起的时间变化计算失误权重, 进而构建出人工工位的人因时变可靠性模型. 以某企业发动机装配线的人工工位为例, 进行人因可靠性的建模研究, 验证所提方法的有效性.

1 问题描述

发动机装配线是指以一定节拍组装发动机零部件的流水线, 其一般由人工工位、自动工位及机器人工位组成. 虽然人工工位的作业时间波动较大, 但由于其成本低、柔性高, 故其应用较多. 一般在人工工上位上设有装配工具、标准作业程序及零部件, 其作业周期数、工作时间及休息时间由企业的作息时间确定, 其作业过程为: 首先辨别达到工位的发动机型号, 再根据装配工艺, 借助工具进行零部件的装配, 作业完成后将发动机放行. 若作业时间超过节拍, 或出现作业失误, 则认为此次作业不可靠.

本文所研究的人工工位具有以下特点: ①劳动强度较低, 物料的质量不超过 2 kg; ②防错设计良好, 使用错误的零部件将无法完成装配; ③装配工艺的内容较多, 人员在节拍内的大多数时间均处于作业状态. 因此人工工位在进行作业时, 作业时间及作业失误受认知及疲劳程度的影响较大. 以往的人因可靠性研究虽然考虑了认知及疲劳的因素, 但由于其在人因可靠性的定义上未涉及作业时间超过节拍的情况, 且未结合实际作业情况对作业过程进行详细分析, 因此难以准确描述实际中随工作日及作业次数而变的作业时间及人因可靠性. 本文结合实际的作业情况, 对作业时间及作业失误进行分析.

作业时间可分两部分: 认知时间及生理作业时间. 认知时间主要受认知程度的影响, 作业次数及工作日的增加将提高认知程度, 使得认知时间缩短, 但其最小值由个人能力及所需要收集的信息量决定;

另外,长时间的认知行为及生理疲劳将导致认知效率的降低,使得认知时间延长.生理作业时间主要受疲劳程度的影响,且其最小值由生理状态及任务量决定.当作业间断时,遗忘现象引起认知程度的降低,同时,体力恢复现象将减轻认知疲劳及生理疲劳.

作业失误亦可分为两部分:错误识别零部件及疲劳失误.防错设计良好的人工工位不易发生错误识别零部件的情况,此时作业失误主要由疲劳失误导致.疲劳失误主要表现为:随着疲劳的累积,人员的作业效率及对肢体的控制能力的下降,进而使得动作精度下降,并引起作业的不到位,例如拧紧螺栓时的扭矩不合格.当作业间断时,人员停止作业并进入休息阶段,疲劳程度得到缓解,疲劳失误现象有所减少.

2 人因时变可靠性模型建立

基于学习遗忘与疲劳累积理论,在上一节分析的基础上,引入最短认知时间、认知疲劳及最短生理作业时间,根据实际作业情况对认知时间及作业时间进行描述,并进一步求解疲劳失误率和认知失误率,最终将失误率加权后构建人因时变可靠性模型,同时给出加权参数的确定方法.

2.1 考虑最短认知过程及疲劳的认知时间

装配时需要收集的外界信息包括装配对象、装配工艺及装配位置等,人员从察觉信息变化到执行对应作业需要一定的反应过程^[17],故引入最短认知时间描述此过程.长时间的认知任务将导致认知效率的降低,即产生认知疲劳.由于疲劳累积同样会导致认知效率的降低^[18],故本文将其归于认知疲劳的范畴.因此,考虑最短认知时间、认知疲劳的认知时间可表示为

$$t_{n,x,i} = \Delta T_{l_{n,x,i}} + \Delta T_{f_{n,x,i}} + T_{\min} \quad (1)$$

式中: $t_{n,x,i}$ 表示在第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业的认知时间; $\Delta T_{l_{n,x,i}}$ 表示第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业时由认知引起的时间变化量; $\Delta T_{f_{n,x,i}}$ 表示第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业时由认知疲劳引起的时间延长量; T_{\min} 为最短认知时间.各变量的具体讨论如下:

执行第 n 个工作日第 i 个周期中第 x 次作业时,由认知引起的时间变化量为

$$\Delta T_{l_{n,x,i}} = \Delta T_{l_{n,\max}}(x + u_{n,i})^{-b} \quad (2)$$

式中: $\Delta T_{l_{n,\max}}$ 为第 n 个工作日时认知引起的时间变化量的最大值; $u_{n,i}$ 为第 n 个工作日的第 i 个周期的记忆作业次数,首次作业时其值为0; b 为学习指数.

$\Delta T_{l_{n,\max}}$ 受到学习效应影响而逐渐降低,且随着工作日增加,由认知引起的时间变化量趋近于0,故 $\Delta T_{l_{n,\max}}$ 为

$$\Delta T_{l_{n,\max}} = \Delta T_{l_{1,\max}}(n)^{-b} \quad (3)$$

式中: $\Delta T_{l_{1,\max}}$ 表示在第1个工作日认知引起的时间变化量的最大值.

$u_{n,i}$ 与 $u_{n,i+1}$ 有如下递推关系^[9]:

$$u_{n,i+1} = (u_{n,i} + z_{n,i})^{1+f/b} S_{n,i} \quad (4)$$

式中: $z_{n,i}$ 为第 n 个工作日的第 i 个周期内的总作业次数; $S_{n,i}$ 为第 n 个工作日的第 i 个周期内不休息时的总作业次数; f 为遗忘指数.

认知疲劳未累积时,由认知疲劳引起的认知时间延长为0;疲劳程度增加,则 $\Delta T_{f_{n,x,i}}$ 增加且小于 $\Delta T_{l_{n,\max}}$,故认知疲劳引起的时间延长为

$$\Delta T_{f_{n,x,i}} = \Delta T_{l_{n,\max}} F\left(\sum_{k=1}^{x-1} t_{n,k,i}\right) / F_{\max} \quad (5)$$

式中: $t_{n,k,i}$ 表示第 n 个工作日的第 i 个周期的第 k 次作业的作业时间; $F\left(\sum_{k=1}^{x-1} t_{n,k,i}\right)$ 表示执行第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业时的疲劳值; F_{\max} 为疲劳的最大值,并取 $F_{\max} = 1$.

经过作业时间 t 后积累的疲劳值 $F(t)$ 为^[9]

$$F(t) = R(t_r) + [1 - R(t_r)][1 - \exp(-\lambda t)] \quad (6)$$

式中: λ 为疲劳指数; $R(t_r)$ 表示作业开始时的残余疲劳值,即

$$R(t_r) = F_0 \exp(-\mu t_r) \quad (7)$$

式中: F_0 为前1作业周期间断时的疲劳值; μ 为疲劳恢复指数; t_r 为作业间断时间.

2.2 考虑认知过程及最短生理操作过程的作业时间

在进行作业时,首先对外界信息进行认知,而后执行对应的操作,即先经过认知过程,随后进入生理作业过程,故作业时间由认知时间以及生理作业时间决定,可表示为

$$t_{n,x,i} = t_{n,x,i} + t_{n,x,i} \quad (8)$$

式中: $t_{n,x,i}$ 表示第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业时的生理作业时间.

从生理角度而言,动作效率随疲劳累积而降低;且执行操作时存在最短的生理操作过程,故需要引入最短生理作业时间对其进行描述.故生理作业时间为

$$t_{n,x,i} = \Delta T_{t_{n,max}} F(\sum_{k=1}^{x-1} t_{n,x,i}) / F_{fin_n} + T_{fmin} \quad (9)$$

式中： $\Delta T_{t_{n,max}}$ 表示生理上第 n 个工作日由疲劳引起的时间延长量的最大值； F_{fin_n} 为第 n 个工作日完工时的疲劳值； T_{fmin} 为最短生理作业时间。

2.3 疲劳失误率及基于 HCR 方法的认知失误率

当认知程度一定时，人因失误率与疲劳程度呈正相关关系，因此可利用当前疲劳程度与最大疲劳程度之比表示疲劳失误率。根据文献[14]中对人因失误率范围的估计及修正方法，基于式(8)，进行第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业时的疲劳失误率 $u_f(n, x, i)$ 可以表示为

$$u_f(n, x, i) = [F(\sum_{k=1}^{x-1} t_{n,k,i}) / F_{max}]^6 \quad (10)$$

由于不同工作日的作业量基本相同，因此可近似认为不同工作日中由疲劳过程引起的生理作业时间的变化呈周期性，而认知过程对不同工作日的作业时间影响较大，因此可根据认知时间超出允许认知的概率，即认知失误率，对作业时间超出节拍的情况进行描述。

根据式(1)与 HCR 方法[3]，人员在第 n 个工作日操作第 i 个周期内第 x 次产品时的认知失误率 $u_1(n, x, i)$ 描述为

$$u_1(n, x, i) = \exp[-(\frac{2T_{1n,x,i}/t_{n,x,i} - C_{ri}}{C_{\eta i}})^{\beta_i}] \quad (11)$$

式中： C_{ri} 、 $C_{\eta i}$ 、 β_i 为不同任务类型对应的规范化最短反应时间参数、特征反应参数和形状参数； $T_{1n,x,i}$ 表示第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 次作业时允许的认知时间。

考虑到作业时间应小于等于节拍，故在节拍 c 一定的情况下，允许的认知时间 $T_{1n,x,i}$ 受生理作业时间的影响。疲劳程度的变化引起生理作业时间的改变，使得允许的认知时间也随之改变，故其与节拍 c 及生理作业时间 $t_{n,x,i}$ 应满足

$$T_{1n,x,i} = c - t_{n,x,i} \quad (12)$$

2.4 结合失误权重的人因时变可靠性模型

综合考虑认知失误率及疲劳失误率，对其进行加权后可得人因时变失误率为

$$U(n, x, i) = \alpha u_1(n, x, i) + \beta u_f(n, x, i) \quad (13)$$

式中： $U(n, x, i)$ 为装配第 n 个工作日的第 i 个周期的第 x 件产品时的人因失误率； α 和 β 分别为认知失误和疲劳失误权重。

失误权重值应满足总和为 1，为了确定 α 和 β 的取值，Elmaraghy 等[14]给出了一种经验方法：在作业

中如果认知过程占的比例较大，则 $\alpha = 2/3, \beta = 1/3$ ；反之，则 $\alpha = 1/3, \beta = 2/3$ 。该方法难以准确描述认知失误和疲劳失误对人因可靠性产生的影响，因此，本文根据作业过程中认知过程与疲劳过程引起的作业时间的变化量，给出一种计算认知失误与疲劳失误权重的方法，即

$$\alpha = \frac{\Delta T_{t_{1,max}}}{\Delta T_{t_{1,max}} + \Delta T_{f_{1,max}}}, \beta = \frac{\Delta T_{f_{1,max}}}{\Delta T_{t_{1,max}} + \Delta T_{f_{1,max}}} \quad (14)$$

故由式(13)可得人因时变可靠性模型为

$$P(n, x, i) = 1 - U(n, x, i) \quad (15)$$

式中： $P(n, x, i)$ 表示第 n 个工作日装配第 i 个周期的第 x 件产品时的人因可靠性。

为评价单个工作日的人因可靠性，引入平均人因可靠性

$$\bar{P}_n = \sum_{j=1}^{\omega_n} \sum_{k=1}^{z_{n,j}} P(n, k, j) / \sum_{j=1}^{\omega_n} z_{n,j} \quad (16)$$

式中： \bar{P}_n 为第 n 个工作日的平均人因可靠性； ω_n 为第 n 个工作日总工作周期数。

3 实例验证

3.1 作业现状

某企业发动机装配线主要生产某 1.0T, 1.4T 及 1.5T 汽油发动机，设计产量为每年 30 万台，开动率 95%，生产节拍 75 s。初期仅生产 1.4T 汽油发动机，实施一班工作制，其中包含 8 h 正常工作时间与 2 h 延长工作时间。该装配线由内装线和外装线构成，其中外装线人工工位的作业较为复杂，因此下文以之为对象进行研究。外装线由专机工位和人工工位构成，共有 36 个工位，其中有 29 个人工工位，整线节拍为 75 s，其布局如图 1 所示。图 1 中点代表人工工位，方块代表自动工位，其中 OP310 为线束装配工位。发动机从 OP10 上线，至 OP360 下线，其流向如图中箭头所示。线上人员的作息时间如表 1 所示。

表 1 某发动机装配线的作息时间

作业周期	工作时间/h	休息时间/h
8:00—11:00 (第 1 作业周期)	3.0	0.5 (第 1 作业间断)
11:30—17:00 (第 2 作业周期)	5.5	0.5 (第 2 作业间断)
17:30—19:00 (第 3 作业周期)	1.5	(下班)

本文以线束装配工位 OP310 为研究对象，该工

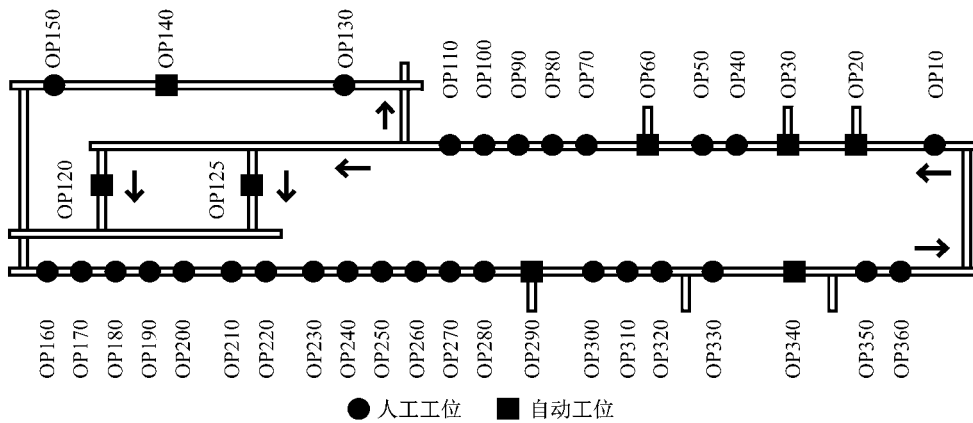


图 1 某企业汽车发动机外装线布局图

Fig. 1 Layout of the external part of an engine assembly line

位上人员需要完成的装配内容如表 2 所示. 当发动机到达该工位后, 人员首先利用 RFID (radio frequency identification) 设备将发动机信息录入, 并在服务器中创建出装配日志, 随后在使用电动拧紧枪拧紧时, 拧紧数据将被存储于对应的日志中, 包括拧紧的扭矩及拧紧时的时刻, 每使用一次电动拧紧枪, 就会生成一条拧紧数据. 服务器中的日志能够便捷地导出包含拧紧数据的列表. 由于该工位上待装配的线束插头较多, 在认知程度较低的时期, 该工位的作业时间较长, 易发生超时的情况. 随着认知程度的提高, 作业时间逐渐缩短, 该工位的超时情况有所改善, 但仍有较多的超时情况发生. 因此, 为了描述人工工位在节拍内正确完成作业的情况, 有必要对其作业过程进行研究, 并建立相关的可靠性模型.

表 2 线束装配工位的装配工艺

序号	主要步骤	工时/s
1	安装加油口盖总成	8
2	用电动拧紧枪拧紧发动机线束接地螺钉, 扭矩(8.5±1.5)N·m	8
3	用电动拧紧枪拧紧发动机线束支架螺母, 扭矩(8.5±1.5)N·m	8
4	连接发动机线束插头	50
总计		74

3.2 模型参数求解

人因时变可靠性模型中待确定的参数求解如下:

(1) 第 n 个工作日完工时的疲劳值 F_{fin_n}

每个工作日的工作量随工作日变化的幅度较小, 故将 F_{fin_n} 简化为定值. 由于装配作业中体力劳动较轻, 在作业结束后人员的疲劳程度处于中上水平, 结合工程实际, 完工时的疲劳值 $F_{fin_n} = 0.6$.

(2) 疲劳指数 λ

作业初始阶段人员的疲劳值为 0, 完工时的疲劳

值 $F_{fin_n} = 0.6$, 根据式(6)可得 $\lambda = 2.33 \times 10^{-5}$.

(3) 疲劳恢复指数 μ

根据人员疲劳恢复速率的快慢, 可将疲劳恢复指数 μ 分成 3 个等级^[9]: 快速、中速、慢速, 对应的数值分别为 3.167×10^{-3} 、 1.600×10^{-4} 、 1.067×10^{-3} . 人员的疲劳恢复速率适中, 取 $\mu = 1.600 \times 10^{-4}$.

(4) 最短生理作业时间 T_{fmin}

根据 MODAPTS (modular arrangement of predetermined time standards) 方法^[19]对表 2 中的装配工艺进行分解, 计算其最短作业时间, 见表 3.

由表 3 可知, 装配工艺共 284 个 MOD (MODAPTS 法中的时间计量单位), 正常作业时, 1 个 MOD 为 0.129 s, 故 $T_{fmin} = 284 \times 0.129 \text{ s} = 36.636 \text{ s}$.

(5) 学习指数 b 、第 1 个工作日认知引起的时间变化量的最大值 $\Delta T_{l_{max}}$ 、最短认知时间 T_{lmin}

由于装配线系统中仅记录了执行拧紧作业的时间点, 故将人员先后完成两次相同操作的时间间隔作为作业时间. 该时间将反应出认知过程、疲劳过程以及诸多外界的随机因素, 但倘若作业时间较短, 则其受到随机因素影响的可能性较小. 据此对最短作业时间进行拟合以获得相关参数, 此时式(8)可化为

$$t_{n,x,i} = \Delta T_{l_{max}} [(x+u)n]^{-b} + T_{lmin} + T_{fmin} \quad (17)$$

根据 180 d 中的 95 个工作日的实际最短作业时间数据, 利用最小二乘法拟合式(17), 拟合情况如图 2 所示.

图 2 中, 点为每个工作日的实际最短作业时间, 曲线为拟合得到的最短作业时间曲线, 其表达式为: $t_n = 166.97 \times (304.1n)^{-0.2551} + 41.96$. 故 $\Delta T_{l_{max}} = 166.97 \text{ s}$, $b = 0.2551$, $T_{lmin} + T_{fmin} = 41.96 \text{ s}$, 由于 $T_{fmin} = 36.636 \text{ s}$, 故 $T_{lmin} = 5.324 \text{ s}$.

(6) 生理上第 n 个工作日由疲劳引起的时间延

长量的最大值 $\Delta T_{f_{i,max}}$ 根据工程实际,线束装配工位由疲劳引起的生理作业时间的变化量约占作业节拍的 10%,故 $\Delta T_{f_{i,max}} = 10\% \times 74 \text{ s} = 7.4 \text{ s}$.

表 3 根据 MODAPTS 方法计算最短生理作业时间

Tab.3 Calculation of the minim physical operation time in MODAPTS

序号	左手动作	右手动作	标记记号	次数	MOD
1	延时 BD	抓加油口盖总成并安装 M3G1M3P5L1	M3G1M3P5L1	1	13
2	延时 BD	抓电动拧紧枪并移至身前 M4G1M4G0	M4G1M4G0	1	9
3	抓螺栓拧紧头并安装至拧紧枪 M3G1M3P5	持住 H	M3G1M3P5	1	12
4	延时 BD	拧紧接地螺栓 M3P5M1A4	M3P5M1A4	2	26
5	拆下螺栓拧紧头并放回 M3P2M3P2	将拧紧枪移至身前 M3G0	M3P2M3P2	1	10
6	抓螺母拧紧头并安装至拧紧枪 M2G1M3P5	持住 H	M2G1M3P5	1	11
7	延时 BD	拧紧支架螺母 M3P5M1A4	M3P5M1A4	1	13
8	拆下螺母拧紧头并放回 M3P2M3P2	将拧紧枪移至身前 (M3G0)	M3P2M3P2	1	10
9	延时 BD	连接发动机线束插头 M3G3D3R2M1P5M1A4	M3G3D3R2 M1P5M1A4	8	176
10	延时 BD	按放行按钮 M4G0	M4G0	1	4
总计					284

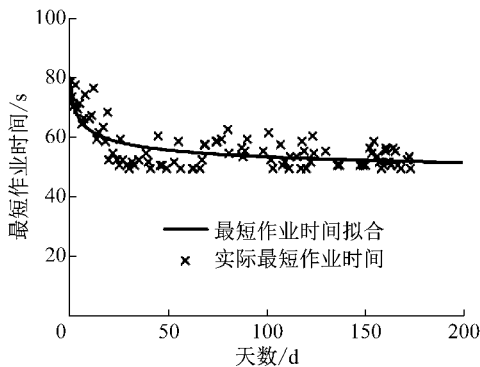


图 2 作业时间拟合

Fig. 2 Operation time fitting

(7) 规范化最短反应时间参数 C_{r_i} 、特征反应参数 C_{η_i} 、形状参数 β_i .

人工装配作业属于技能型任务,根据文献[3],我国人员的规范化最短反应时间参数、特征反应参数和形状参数分别取 $C_{r_i} = 0.29, C_{\eta_i} = 0.87, \beta_i = 1.79$.

(8) 认知失误权重 α 、疲劳失误权重 β

为了使不同时期所求得的人因可靠性具有可比性,其评价标准应相同,即失误权重为定值.将第 1 个工作日的 $\Delta T_{1,max}$ 和 $\Delta T_{f_{1,max}}$ 代入式(14)可得

$$\alpha = \frac{\Delta T_{1,max}}{\Delta T_{1,max} + \Delta T_{f_{1,max}}} = \frac{166.97}{166.97 + 7.4} = 0.958$$

$$\beta = \frac{\Delta T_{f_{i,max}}}{\Delta T_{1,max} + \Delta T_{f_{i,max}}} = \frac{7.4}{166.97 + 7.4} = 0.042$$

3.3 模型应用及其验证

由失误权重可推知,作业时间的变化对人因可靠性有着很大的影响,疲劳失误率对人因可靠性的影响则相对较小,故人因可靠性变化与认知可靠性的变化相近.将所求得的参数代入式(15),可得第 1 个工作日的人因可靠性随作业次数的变化如图 3 所示.

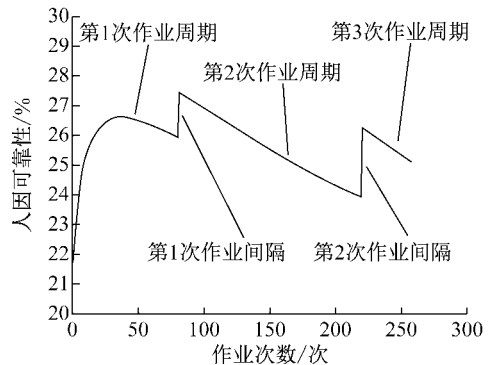


图 3 第一个工作日的人因可靠性变化

Fig. 3 HR variation on the first working day

如图 3 所示,由于初期 $\Delta T_{1,i}$ 减小的速率大于 ΔT_{f_i} 的增加速率,由式(1)及式(11)可得认知时间 t_1 和认知失误率 u_1 下降,故人因可靠性 U 上升.但随

着 x 的增加, ΔT_1 接近收敛, 而 ΔT_i 继续增加, 导致 t_1 和 u_1 上升, 故人因可靠性 U 开始逐渐下降. 第 1 作业周期即将结束时, 相对于首次作业而言, 人因可靠性有着明显的提升. 经过第 1 作业间断 t_r 的休整后, 人员的疲劳程度有所缓解, ΔT_i 大幅度地减小. 在第 2 作业周期开始时, 人员的记忆作业次数 u 为一个大于 0 的数, 根据式(2)可知, 第 2 作业周期初期 ΔT_1 的初值较小, 但会更快地收敛. 因此, 在第 2 作业周期中, 由于 ΔT_1 及 ΔT_i 的初值较小, 认知时间 t_1 较短, 认知可靠性较高. 随着作业的进行, ΔT_1 以较快的速度收敛, 同时 ΔT_i 不断增加, 导致 t_1 持续上升, 认知可靠性不断下降, 人因可靠性也随之下降. 由于第 2 作业周期内的作业时间过长, 因此在该周期结束时的人因可靠性偏低. 后续作业周期中人因可靠性的变化过程类似于第 2 作业周期.

利用式(15)可描述随工作日变化的人因可靠性变化趋势. 图 4 为不同工作日内, 人员作业时人因可靠性随作业次数的变化情况.

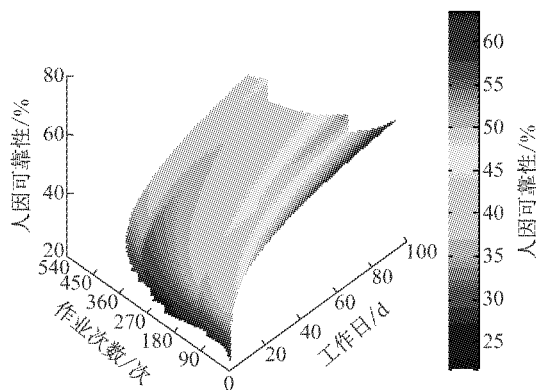


图 4 随作业次数及工作日变化的人因可靠性

Fig. 4 HR variation with operation number and work day

如图 4 所示, 在任意工作日内, 人员的可靠性变化趋势与图 3 所描述的变化趋势大致相同, 均从一个较高的水平逐渐下降, 并在经过作业间断后出现回升. 由于作息时间固定, 该变化趋势具有一定的周期性. 随着工作日的推移, 人因可靠性及每日的作业次数呈上升趋势, 在初期阶段上升趋势较为明显, 后期则相对平稳, 说明该变化主要受到了认知过程的影响, 而非以单个工作日为周期的疲劳过程.

根据该人工工位 180 d 内的 95 个工作日内的拧紧数据, 可观察到的人因失误共两种: 拧紧扭矩不合格以及作业时间超出节拍. 某工作日内, 两种情况总的发生次数占总作业次数的比例, 即可近似地作为人因失误率, 进而得到该工作日的平均人因可靠性. 将不同工作日的平均人因可靠性与根据式(16)

得到的理论值进行对比, 其结果如图 5 所示.

图 5 中, 点表示实际某一工作日的可靠性值, 曲线为通过人因时变可靠性模型计算的随工作日变化的平均人因可靠性. 由图 5 可知, 生产初期, 人因可靠性的统计值低于理论值, 因为装配线在性能爬坡阶段时, 设备的作业能力不稳定, 存在较多的堵塞及缺料现象, 引起人工工位作业的长时间停滞, 导致在统计人因可靠性时认为作业不可靠. 当装配线的性能趋于稳定, 停滞现象减少, 不同工作日的人因可靠性的理论值与统计值的变化趋势有着良好的一致性. 另外, 由于实例中认知失误权重远大于疲劳失误权重, 因此模型主要反映了认知失误对人因可靠性的影响, 其表现为作业发生超时现象. 在生产初期, 作业时间超出节拍的情况较多, 人因可靠性较低, 但随着工作日的推移, 认知程度不断提高, 作业超时的情况减少, 人因可靠性开始逐渐上升. 在生产后期, 人因可靠性约为 50%, 表示作业时间与节拍持平, 可知人工工位能够在节拍内完成作业. 综上所述, 模型能够定量地描述随工作日而变的人因可靠性的变化趋势, 并且能够反映出作业时间是否满足节拍的要求.

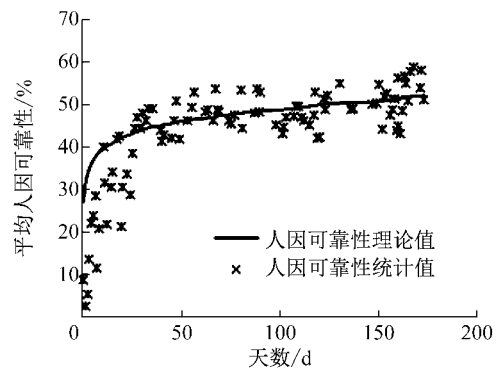


图 5 人因可靠性的统计值与理论值的对比

Fig. 5 Comparison of the statistics HR with the theoretical HR

4 结论

本文基于学习遗忘与疲劳累积理论, 从认知时间及作业时间的角度对人因可靠性进行了研究. 在考虑了最短认知过程、最短作业时间及认知疲劳的基础上, 确定了随工作日变化的认知时间及作业时间, 据此结合节拍得到了认知失误率及疲劳失误率. 通过对失误权重进行计算, 构建了人工工位的人因时变可靠性模型. 以实例验证了模型的有效性, 定量地描述了随工作日而变的人因可靠性的变化趋势,

为发动机装配线人工工位的人因可靠性计算及产能预测提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 窦惠婷, 苏强, 陶文昊. 汽车发动机装配过程中人为缺陷预测研究[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(1): 129.
DOU Huiting, SU Qiang, TAO Wenhao. Study on prediction of the operator-induced defect rate for automobile engine assembling [J]. Industrial Engineering and Management, 2013, 18(1): 129.
- [2] DHILLON B S. Human reliability, error, and human factors in power generation [M]. New York: Springer, 2014.
- [3] 何旭洪, 黄祥瑞. 工业系统中人的可靠性分析: 原理, 方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
HE Xuhong, HUANG Xiangrui. Human reliability analysis in engineering system: theory methods and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [4] 钟飞龙. 变速箱装配过程中人的可靠性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
ZHONG Feilong. Study of human reliability in gearbox assembly process [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [5] 王跃彬. 发动机装配工人因可靠性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WANG Yuebin. The research of human reliability for engine assembly [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009.
- [6] WRIGHT T P. Factors affecting the cost of airplanes [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1936, 3(4): 122.
- [7] DAR-EL E M, AYAS K, GILAD I. A dual-phrase model for the individual learning process in industrial learning process in individual tasks [J]. Iie Transactions, 1995, 27(3): 265.
- [8] JABER M Y, BONNEY M. Production breaks and the learning curve; the forgetting phenomenon [J]. Applied Mathematical Modelling, 1996, 20(2): 162.
- [9] JABER M Y, GIVI Z S, NEUMANN W P. Incorporating human fatigue and recovery into the learning - forgetting process [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(12): 7287.
- [10] KONZ S. Work/rest part II: the scientific basis (knowledge base) for the guide [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1998, 22(1): 73.
- [11] 蔡敏, 商滔, 付辉建, 等. 基于 EEG 和动作分析的手工装配线易疲劳工序[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(2): 68.
CAI Min, SHANG Tao, FU Huijian, *et al.* Research on manual assembly process fatigue optimization based on EEG and motion analysis [J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(2): 68.
- [12] 马红占, 褚学宁, 刘振华, 等. 基于人因仿真分析的装配序列评价模型及应用[J]. 中国机械工程, 2015, 26(5): 652.
MA Hongzhan, CHU Xuening, LIU Zhenhua, *et al.* Assembly sequences evaluation modeling and application based on human factor simulation analysis [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(5): 652.
- [13] MYSZEWSKI J M. Mathematical model of the occurrence of human error in manufacturing processes [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2010, 26(8): 845.
- [14] EIMARAGHY W H, NADA O A, EIMARAGHY H A. Quality prediction for reconfigurable manufacturing systems via human error modelling [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2008, 21(5): 584.
- [15] MICHALOS G, MAKKRIS S, CHRYSOLOURIS G. The effect of job rotation during assembly on the quality of final product [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013, 6(3): 187.
- [16] GIVI Z S, JABER M Y, NEUMANN W P. Modelling worker reliability with learning and fatigue [J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(17): 5186.
- [17] 徐涛. 人类视觉系统的时间响应特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2010.
XU Tao. Investigation on temporal property of human visual system [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology.
- [18] BARKER L M, NUSSBAUM M A. The effects of fatigue on performance in simulated nursing work [J]. Ergonomics, 2011, 54(9): 815.
- [19] 高广章. 基于工效学原理 MOD 法在生产线平衡中的应用[J]. 人类工效学, 2006, 6(15): 14.
GAO Guangzhang. The application of MOD method based on ergonomics in stream line balance [J]. Human Ergonomics, 2006, 6(15): 14.